第40卷 第4期
2023年4月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 4
Apr. 2023

基于5种植被指数的荒漠区植被生物量提取研究

梁博明， 刘 新， 郝媛媛， 楚 彬， 唐庄生

（甘肃农业大学草业学院，草业生态系统教育部重点实验室，国家林业草原高寒草地鼠害防控工程技术研究中心，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 荒漠区植被地上生物量是土地荒漠化监测和荒漠植被遥感信息提取的重要指标。本研究以甘肃民勤县为试验区，以哨兵2号(Sentinel-2)影像为数据源，构建了比值植被指数RVI、归一化植被指数NDVI、差值植被指数DVI、土壤调节植被指数SAVI及优化型土壤调节植被指数OSAVI 5种植被指数与植被实测地上生物量的估算模型(一元线性、指数、对数和二项式模型)，并利用所选的最优模型，估算了研究区的地上生物量。结果表明：SAVI相较于RVI、NDVI、DVI和OSAVI指数同地上生物量之间的相关性最高(r=0.79)，基于SAVI指数的二项式模型是研究区地上生物量估算的最优模型(R^2=0.76)，且精度较高(R^2=0.73，RMSE=0.12)。民勤县的植被相对密集区主要分布于四大灌区(红崖山、环河、昌宁、南湖)、青土湖周边以及红沙岗镇西北区域，其他地域植被较为稀疏，无植被区[<0.005 kg·(100m^2)$^{-1}$]、低植被区[0.005~0.2 kg·(100m^2)$^{-1}$]、中植被区[0.2~0.5 kg·(100m^2)$^{-1}$]和高植被区[>0.5 kg·(100m^2)$^{-1}$]的占比分别为66%、21%、5%和8%。

关键词： 荒漠区植被；地上生物量；植被指数；信息提取；Sentinel数据

土地荒漠化严重威胁着人类的生存环境，制约着全球社会和经济的稳定发展，受到国内外学者的高度重视。中国是世界上荒漠分布广、面积大、危害严重的国家之一[1]。第五次全国荒漠化和沙化土地监测结果显示，中国荒漠化土地面积2.61×10^6 km^2，占国土面积的27.20%[2]，近4×10^{8}人口受到荒漠化的影响[3]。中、美、加国际合作项目研究表明，我国因荒漠化造成的直接经济损失约为每年5.41×10^{10}元人民币[4]。

在荒漠区，地上生物量是反映植被生长发育状况的重要指标，对植被准确估产和品质测定具有重要作用。因此，准确获取植被地上生物量信息对植被长势监测、产量估算、植被区维护与治理等具有重要意义。传统的植被地上生物量测量多是破坏性取样，费时费力，难以满足生态环境中对大面积地上生物量准确及时估测的需求。多光谱遥感监测具有快速、准确、无破坏性等特点，已广泛应用于植被地上生物量的快速获取[5]。植被指数是不同遥感光谱波段间的线性或非线性组合，主要反映植被在可见光、近红外波段反射与土壤背景之间差异的指标，各个植被指数在一定条件下能用来定量说明植被的生长状况[6]，而建立植被指数与植被地上生物量的估算模型已广泛应用于现实研究中。叶静芸等[7]利用样方调查数据和Quick Bird影像数据对乌兰布和沙漠东北缘荒漠-绿洲过渡带植被地上生物量的研究表明，比值植被指数(Ratio Vegetation Index，RVI)线性模型估算荒漠植被地上生物量的效果最好(R^2=0.82，RMSEP=15.07)；陈琪等[8]为了分析内蒙古阿拉善盟草地地上生物量的时空分布规律，构建了1981—2000年NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration，美国国家海洋和大气管理局)NDVI(Normalized Difference Vegetation Index，归一化植被指数)、2001—2018年MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer，中分辨率成像光谱仪)NDVI遥感数据产品和实测地上生物量的关系模型，发现幂函数的相关性最优，模型精度可

收稿日期： 2022-07-31； **修订日期：** 2023-03-02

基金项目： 甘肃省大学生创新创业训练计划项目(S202210733015)；甘肃农业大学大学生创新创业计划项目(202102047)；国家自然科学基金项目(41907406)；甘肃农业大学科技创新基金(GAU-KYQD-2018-23)

作者简介： 梁博明(2000-)，男，主要从事草地生态研究. E-mail: lbm02299@163.com

通讯作者： 郝媛媛. E-mail: haoyy@gsau.edu.cn

达78%;Wu等[9]基于天宫一号高光谱数据的荒漠化地区稀疏植被生物量估测中,SAVI(Soil-Adjusted Vegetation Index,土壤调节植被指数)的一元线性模型R^2高于NDVI;杨丽萍等[10]在内蒙古额济纳的研究表明,基于OSAVI(Optimization Soil-adjusted Vegetation Index,优化型土壤调节植被指数)的TVDI(Temperature Vegetation Dryness Index,温度植被干旱指数)是研究土壤水分反演的最佳模型,可以间接反应研究区地上生物量的分布状况;张锦丽等[11]研究表明,利用Lanndsat-8 OLI影像提取的植被指数DVI(Difference Vegetation Index,差值植被指数)与研究区地上生物量实测数据具有相关性。由此可知,数据源、研究区、植被指数以及拟合关系等都是决定植被地上生物量信息提取模型的因素。

哨兵(Sentinel)数据作为目前分辨率最高(多光谱10 m)的全球性开源数据[12],在植被生物量提取方面相较于MODIS、Landsat等开源数据无疑具有更高的精度,但已有研究中利用其提取荒漠区植被生物量的研究相对较少。位于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间的民勤县是典型的荒漠-绿洲生态系统,是荒漠植被生物量研究的理想场所。因此,本研究以民勤县为研究区,基于Sentinel-2数据构建并筛选不同植被指数与实测地上生物量之间的最优估算模型[13],并评估民勤县的植被生物量分布状况,以期为荒漠区植被地上生物量快速提取研究提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

以甘肃省民勤县为研究区,地理坐标(101°47′39″~104°57′3″E,38°0′39″~39°27′49″N,图1),总面积1.58×10⁶ hm²,海拔1298~1936 m,地处河西走廊东北部,石羊河流域下游[14]。东西北三面被腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠包围,多年(1953—2021年)平均气温8.5 ℃,平均降水量114 mm,平均蒸发量2412 mm,属于典型的温带大陆性干旱气候。区域植被特征明显、群落片层简单,以“灌草丛”为主[15]。由荒漠(沙漠)、荒漠-绿洲过渡带和绿洲3种西北干旱区典型的地表形态组成[16],分布着绿洲灌区、荒漠平原区、沙漠区和山地4种景观,是典型的荒漠-绿洲生态系统[17-18]。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 野外实测数据 野外实测点主要位于荒漠-绿洲过渡带[19],为生态缓冲区[20],兼顾两地植被分布差异,尽可能涵盖全县植被类型[21-22]。采样时间为植被茂盛期的2020年7月18—31日;同时为了与陆地卫星遥感数据空间分辨率保持一致[23],样方大小设置为10 m×10 m,共64个采样点(图1)。在样方内按照五点采样法设置1 m×1 m小样方,记录样方内植被信息(涉及18科、33属、33种,分类地位见表1)后齐地面剪取5个小样方内植物并编号分类[14],带回实验室烘干后取干重平均值,乘100得到百平方米面积上的地上生物量,因此试验中地上生物量统一单位为$kg\cdot(100m^2)^{-1}$。

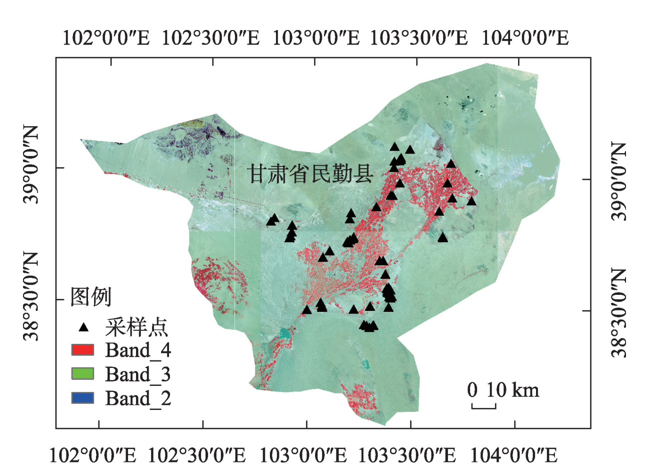


图1 研究区地理位置及采样点分布

Fig. 1 Location and distribution of sampling points in the study area

1.2.2 遥感数据 选取2020年7—8月(以匹配地面实测数据)经过预处理后的哨兵2号(Sentinel-2,表2)L2A级数据产品[23](https:/scihub.copernicus.eu/)的6景影像(表3),并进行影像镶嵌、裁剪等预处理。

1.3 研究方法

1.3.1 植被指数选取及相关性分析 选取估算荒漠植被生物量较好的比值植被指数RVI[7]、应用最为广泛[24]的归一化植被指数NDVI、对环境变化极为敏感且算法简单[25]的DVI、加入土壤调节系数L后可以减弱土壤背景影响[26]的土壤调节植被指数SAVI以及适合于监测耕地人工林[27]的优化型土壤调节植被指数OSAVI 5种植被指数,计算公式见表4,与实测地上生物量之间进行Pearson相关性分析后用于植被地上生物量的反演。

表1　样方内植物物种及其分类地位

Tab. 1　Species and taxonomic status in quadrat

科	属	植物名称
豆科 Fabaceae	苦参属 *Sophora*	苦豆子 *Sophora alopecuroides*
	苦马豆属 *Sphaerophysa*	苦马豆 *Sphaerophysa salsula*
	骆驼刺属 *Alhagi*	骆驼刺 *Alhagi camelorum*
	锦鸡儿属 *Caragana*	拧条锦鸡儿 *Caragana korshinskii*
	甘草属 *Glycyrrhiza*	甘草 *Glycyrrhiza uralensis*
菊科 Asteraceae	花花柴属 *Karelinia*	花花柴 *Karelinia caspia*
	鸦葱属 *Takhtajaniantha*	鸦葱 *Takhtajaniantha austriaca*
	漏芦属 *Rhaponticum*	顶羽菊 *Rhaponticum repens*
	蓝刺头属 *Echinops*	蓝刺头 *Echinops sphaerocephalus*
	旋覆花属 *Inula*	蓼子朴 *Inula salsoloides*
禾本科 Poaceae	芦苇属 *Phragmites*	芦苇 *Phragmites australis*
	虎尾草属 *Chloris*	虎尾草 *Chloris virgata*
	狗尾草属 *Setaria*	狗尾草 *Setaria viridis*
	冰草属 *Agropyron*	冰草 *Agropyron cristatum*
苋科 Amaranthaceae	梭梭属 *Haloxylo*	梭梭 *Haloxylon ammodendron*
	盐生草属 *Halogeton*	蛛丝蓬 *Halogeton arachnoideus*
	盐爪爪属 *Kalidium*	盐爪爪 *Kalidium foliatum*
十字花科 Brassicaceae	独行菜属 *Lepidium*	宽叶独行菜 *Lepidium latifolium*
	肉叶荠属 *Braya*	蚓果芥 *Braya humilis*
藜科 Chenopodiaceae	雾冰藜属 *Bassia*	雾冰藜 *Bassia dasyphylla*
	猪毛菜属 *Salsola*	猪毛菜 *Salsola collinal*
白刺科 Nitrariaceae	骆驼蓬属 *Peganum*	骆驼蓬 *Peganum harmala*
	白刺属 *Nitraria*	白刺 *Nitraria tangutorum*
紫草科 Boraginaceae	紫丹属 *Tournefortia*	砂引草 *Tournefortia sibirica*
白花丹科 Plumbaginaceae	补血草属 *Limonium*	黄花补血草 *Limonium aureum*
石竹科 Caryophyllaceae	石竹属 *Dianthus*	石竹 *Dianthus chinensis*
旋花科 Convolvulaceae	旋花属 *Convolvulus*	田旋花 *Convolvulus arvensis*
夹竹桃科 Apocynaceae	鹅绒藤属 *Cynanchum*	戟叶鹅绒藤 *Cynanchum acutum*
柽柳科 Tamaricaceae	柽柳属 *Tamarix*	柽柳 *Tamarix chinensis*
胡颓子科 Elaeagnaceae	胡颓子属 *Elaeagnus*	沙枣 *Elaeagnus angustifolia*
毛茛科 Ranunculaceae	铁线莲属 *Clematis*	黄花铁线莲 *Clematis intricata*
麻黄科 Ephedraceae	麻黄属 *Ephedra*	草麻黄 *Ephedra sinica*
茄科 Solanaceae	枸杞属 *Lycium*	枸杞 *Lycium chinense*

1.3.2　最优模型筛选及精度验证　为防止过度拟合[28],设置64个样点数据中训练集与验证集比例为2:1[29-30]。

基于经验统计法,构建5种植被指数与实测地上生物量(训练集:43个样点)之间的一元线性、对数、指数和二项式估算模型,并根据决定系数[31] R^2(Coefficient of Determination)评估并筛选最优估算模型。

再依据估算值与实测值(验证集:21个样点)之间线性拟合的 R^2 和均方根误差RMSE(Root Mean Square Error)对最优模型进行精度评价。计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i + M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i + \bar{X})^2} \tag{1}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(M_i - O_i)^2}{N}} \tag{2}$$

式中:n、i 分别为数据个数第几个数;$\bar{X}$ 表示地上生物量实测的均值;M_i 和 O_i 分别为地上生物量的估算值和观测值。

表2 哨兵2号数据波段特征

Tab. 2 Band characteristics of Sentinel-2 data

波段号	哨兵2号波段	中心波长/nm	空间分辨率/m
1	Coastal aerosol	433	60
2	Blue	490	10
3	Green	560	10
4	Red	665	10
5	Vegetation Red Edge	705	20
6	Vegetation Red Edge	740	20
7	Vegetation Red Edge	783	20
8	NIR	842	10
8A	Vegetation Red Edge	865	20
9	Water vapour	945	60
10	SWIR-Cirrus	1375	60
11	SWIR	1610	20
12	SWIR	2190	20

表3 研究区遥感影像数据列表

Tab. 3 List of remote sensing image data in the study area

影像编号	成像日期	处理基线编号	相对轨道编号	拼接地域编号
1	2020-07-26	N0214	R004	T48SUJ
2	2020-07-26	N0214	R004	T48SVH
3	2020-07-26	N0214	R004	T48STJ
4	2020-07-26	N0214	R004	T48SUH
5	2020-08-05	N0214	R004	T48STH

表4 植被指数及其计算公式

Tab. 4 Vegetation index and its calculation formula

植被指数	计算公式
比值植被指数RVI	RVI=NIR/RED
归一化植被指数NDVI	NDVI=(NIR−RED)/(NIR+RED)
差值植被指数DVI	DVI=NIR−RED
土壤调节植被指数SAVI	SAVI=(1 + L)(NIR−RED)/(NIR+RED+L)
优化型土壤调节植被指数OSAVI	OSAVI=(NIR−RED)/(NIR+RED+X)

注：NIR为近红外波段；RED为可见光红光波段；L为土壤调节系数，L=0.5；X为土壤调节参数，最佳取值为0.16。

1.3.3 研究区植被生物量反演 研究区群落整体植株矮小、植被稀疏，生物量低[32-33]，利用植被类型实地占比分布状况[34]，结合植被间的共生关系[35]，按生物量大小划分民勤县植被分布状况[36-38]（表5）。

表5 研究区植被地上生物量划分标准

Tab. 5 Classification standard of aboveground biomass of vegetation in the study area

植被划分	植被地上生物量/[kg·(100m²)⁻¹]	覆被特征
无植被区	<0.005	沙地、盐碱地和裸土地等
低植被区	0.005~0.2	低产草地、撂荒地、疏林地以及中度沙化、盐渍化土地等
中植被区	0.2~0.5	中产草地、低郁闭林地、灌木林地以及轻度沙化、盐渍化土地等
高植被区	>0.5	高产草地、耕地和密林等

2 结果与分析

2.1 植被指数与地上生物量的相关性

RVI、NDVI、DVI、SAVI和OSAVI 5种植被指数与植被地上生物量均呈显著正相关关系（P<0.05），相关系数为0.67~0.79（表6），均可用于植被地上生物量估算。

表6 5种植被指数与地上生物量的相关性

Tab. 6 Correlation between five vegetation indexes and aboveground biomass

相关系数	RVI	NDVI	DVI	SAVI	OSAVI
r	0.70*	0.68*	0.67*	0.79*	0.67*

注：*表示通过P<0.05显著性水平。

2.2 最优模型筛选

基于5种植被指数分别构建地上生物量的一元线性、对数，指数和二项式估算模型（表7）。基于SAVI的地上生物量模型效果表现最佳，4种拟合方法的决定系数R^2分别为0.62、0.21、0.73和0.76；NDVI次之，R^2分别为0.46、0.15、0.60和0.63；RVI 4种拟合方法的平均R^2较大（0.53），仅次于SAVI（0.58），且对数估算模型是5种植被指数对数估算模型中最好的（R^2=0.44），但指数和二项式2种拟合方式均不及其他4种指数；DVI和OSAVI最差。因此，基于SAVI的二项式模型为估算民勤荒漠区植被地上生物量的最优模型。

2.3 估算精度评价

由地上生物量估算值与验证集之间的线性拟合关系可知（图2），决定系数R^2为0.73，通过P<0.05显著性水平检验，均方根误差RMSE为0.12，模型精度符合要求，可用于民勤荒漠植被地上生物量信息的提取。

2.4 植被生物量反演

基于SAVI二项式模型的民勤植被地上生物量空间分布（图3）结果表明，民勤县近2/3区域为沙漠、戈壁等无植被区（66%）；低植被区面积次之，占研究区面积的1/5，主要分布在民红公路沿线以及绿

表7　基于遥感影像植被指数的地上生物量估算模型

Tab. 7　Estimation model of aboveground biomass based on vegetation index from remote sensing image

植被指数	估算模型	R^2
RVI	$y = 0.8487x - 0.0043$	0.59
	$y = 0.226\ln(x) + 0.558$	0.44
	$y = 0.05e^{3.5318x}$	0.49
	$y = 0.3182x^2 + 0.5621x + 0.0385$	0.60
NDVI	$y = 0.57x + 0.0196$	0.46
	$y = 0.0475\ln(x) + 0.2385$	0.15
	$y = 0.0655e^{2.2292x}$	0.60
	$y = 1.2093x^2 - 0.2675x + 0.0998$	0.63
DVI	$y = 2691.5x + 166.29$	0.44
	$y = 219.99\ln(x) + 1190.7$	0.14
	$y = 380.99e^{1.9669x}$	0.57
	$y = 5736.5x^2 - 1280.9x + 546.96$	0.62
SAVI	$y = 0.8396x + 0.0364$	0.62
	$y = 0.0707\ln(x) + 0.3604$	0.21
	$y = 0.101e^{2.3966x}$	0.73
	$y = 1.3554x^2 - 0.099x + 0.1263$	0.76
OSAVI	$y = 0.689x + 0.017$	0.45
	$y = 0.0578\ln(x) + 0.2823$	0.15
	$y = 0.0707e^{2.3733x}$	0.59
	$y = 1.412x^2 - 0.2888x + 0.1107$	0.61

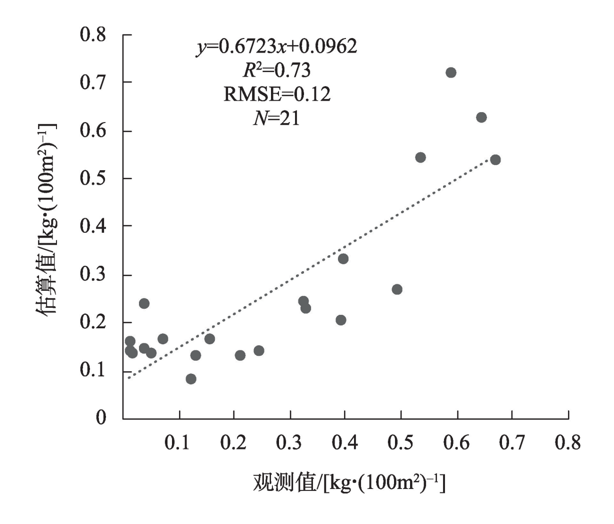


图2　地上生物量估算值与观测值拟合结果

Fig. 2　Fitting of aboveground biomass between estimation and observation

洲外围的沙漠和荒漠中;中植被区面积最小,仅为县域面积的1/20,多分布在人工植被和高植被区域中天然植被的外围;高植被区主要分布在红崖山、环河、昌宁和南湖4大灌区(人工植被)以及青土湖、红沙岗镇西北部等区域(天然植被),占比不足10%。

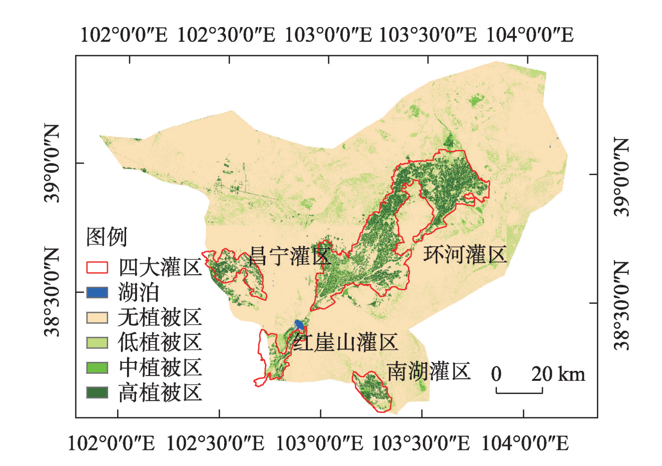


图3　基于SAVI二项式模型的研究区地上生物量空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of aboveground biomass in the study area based on SAVI index binomial model

3　讨 论

民勤地处腾格里沙漠与巴丹吉林沙漠的交接处,其土地干旱、植被稀疏[39]。植被地上生物量为体现植被生长状况最重要的指标,其值的大小直接反应了该地区植被生长的优劣[40]。为了能更好的反演地上生物量的分布状况,研究采用了空间分辨率高、云量小的哨兵2号遥感影像与植被地上生物量相结合的方式,估算荒漠区植被地上生物量。

通过对植被稀疏的荒漠区进行地上生物量提取分析,结果表明SAVI指数与地上生物量的相关性最好,模拟效果均优于其他植被指数,与马中刚[41]对河北康保县和张锦丽等[42]对准噶尔盆地的荒漠区植被地上生物量反演研究结果一致。这是由于SAVI指数通过向NDVI指数的分母中引入土壤调节系数L,进一步降低了土壤背景变化对植被指数的影响。L是SAVI指数提取植被信息的关键,取值范围为0~1,$L = 0$时,表示植被覆盖为0,$L= 1$时,表示植被覆盖度非常高。这与Huete等[43]提出的对于调整不同的L,SAVI指数几乎可以排除由土壤背景等因素所造成的植被指数变化的研究结果基本保持一致。

利用经验统计法,构建基于不同植被指数的地上生物量估算模型(一元线性、对数,指数和二项式模型),并利用最优模型进一步对地上生物量的空间分布展开研究。该模型方法参数输入单一,计算简单,经常应用于遥感图像数据与野外实测数据相结合的模型构建,因此,在本次研究中,取得的结果较为良好,同时也为荒漠地带植被的地上生物量研

究提供依据。

4 结 论

通过对民勤地区植被地上生物量与植被指数的研究,得出如下结论:

(1) RVI、NDVI、DVI、SAVI和OSAVI 5种植被指数与植被地上生物量均呈显著正相关关系($P<0.05$),且SAVI的相关性最高($r=0.79$)。

(2) 基于SAVI指数的二项式模型是研究区地上生物量估算的最优模型($R^2=0.76$),且精度较高($R^2=0.73$,RMSE=0.12)。

(3) 民勤县植被相对密集区主要分布于四大灌区(红崖山、环河、昌宁、南湖)、青土湖周边以及红沙岗镇西北区域,其他地域植被较为稀疏,无植被区[<0.005 kg·$(100m^2)^{-1}$]、低植被区[0.005~0.2 kg·$(100m^2)^{-1}$]、中植被区[0.2~0.5 kg·$(100m^2)^{-1}$]和高植被区[>0.5 kg·$(100m^2)^{-1}$]的占比分别为66%、21%、5%和8%。

参考文献(References):

[1] 匡志盈. 全球防治荒漠化情况综述[J]. 世界农业, 2006(10): 8-10. [Kuang Zhiyin. Review of global desertification control[J]. World Agriculture, 2006(10): 8-10.]

[2] 滕玲. 第五次全国荒漠化和沙化土地监测结果发布——十年治沙:剩下的都是"硬骨头"[J]. 地球, 2016, 238(2): 50-53. [Teng Ling. Fifth National Desertification and Desertification Land Monitoring Results Released-Ten Years of Desertification Control: The Remaining are 'Hard Bones'[J]. Earth, 2016, 238(2): 50-53.]

[3] 杨俊杰. 荒漠化灾害经济损失及防沙治沙工程效益评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2006. [Yang Junjie. Desertification Calamity Economic Evaluation and Desertification Combating Engineering Profit Evaluation[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.]

[4] 杨俊杰, 张克斌, 乔锋, 等. 荒漠化灾害经济损失研究进展[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 40-43. [Yang Junjie, Zhang Kebin, Qiao Feng, et al. The research course in study of economic loss of desertification[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(4): 40-43.]

[5] 杨福芹, 冯海宽, 刘小强, 等. 马铃薯地上部干生物量光谱指数的建立及模型构建[J]. 东北农业科学, 2022, 47(5): 107-110. [Yang Fuqin, Feng Haikuan, Liu Xiaoqiang, et al. Establishment and model construction based on spectral Index of aboveg-round dry biomass of potato[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47(5): 107-110.]

[6] 康耀江. 植被指数在草地遥感中的应用初探[J]. 湖南农业科学, 2011, 261(Z1): 39-41. [Kang Yaojiang. Application of vegetation index in grassland remote sensing[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011, 261(Z1): 39-41.]

[7] 叶静芸, 吴波, 刘明虎, 等. 乌兰布和沙漠东北缘荒漠-绿洲过渡带植被地上生物量估算[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1216-1225. [Ye Jingyun, Wu Bo, Liu Minghu, et al. Estimation of aboveground biomass of vegetation in the desert-oasis transitional zone on the northeastern margin of the Ulan Buh Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4): 1216-1225.]

[8] 陈琪, 赵健, 杨九艳, 等. 荒漠草场地上生物量的遥感监测——以内蒙古阿拉善盟为例[J]. 中国草地学报, 2020, 42(2): 105-116. [Chen Qi, Zhao Jian, Yang Jiuyan, et al. Remote sensing monitoring of biomass on desert grassland: a case study of Alxa League in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(2): 105-116.]

[9] Wu Junjun, Gao Zhihai, Li Zengyuan, et al. Estimation for sparse vegetation information in desertification region based on Tiangong-1 hyperspectral image[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(3): 751-756.

[10] 杨丽萍, 白宇兴, 朱江山, 等. 基于优选植被指数和TVDI的额济纳绿洲旱情监测[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 727-734. [Yang Liping, Bai Yuxing, Zhu Jiangshan, et al. Drought monitoring in Ejina Oasis based on optimal vegetation index and TVDI[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2021, 57(6): 727-734.]

[11] 张锦丽. 准噶尔盆地荒漠草地植被生物量遥感反演研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020. [Zhang Jinli. Study on Biomass Inversion of Desert Grassland in Junggar Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2020.]

[12] 曹文梅, 刘廷玺, 王喜喜, 等. 科尔沁沙丘草甸相间地区土地利用与覆被识别[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 526-535. [Cao Wenmei, Liu Tingxi, Wang Xixi, et al. Land use and land cover classifications of Horqin Sandy Land dune-meadow areas[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 526-535.]

[13] 郑朝菊. 基于激光雷达和外推模型的森林地上生物量估算研究[D]. 北京:中国科学院遥感与数字地球研究所, 2017. [Zheng Zhaoju. Forest Aboveground Biomass Estimation Using LiDAR and Scaling Model in the Three Gorges Region of China[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, 2017.]

[14] 徐高兴, 赵鹏, 陈思航, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带沙拐枣群落种间关联及生态位研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(1): 25-33. [Xu Gaoxing, Zhao Peng, Chen Sihang, et al. Interspecific association and niche of *Calligonum mongolicum* community in Minqin oasis-desert transition zone[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(1): 25-33.]

[15] 赵鹏, 朱淑娟, 段晓峰, 等. 民勤绿洲边缘阻沙带表层土壤粒度空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1335-1345. [Zhao Peng, Zhu Shujuan, Duan Xiaofeng, et al. Spatial distribution characteristics of grain size of surface soil in the sand-resitant belt of Minqin Oasis marginal[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1335-1345.]

[16] 李耀辉, 沈洁, 赵建华, 等. 地形对民勤沙尘暴发生发展影响的模拟研究——以一次特强沙尘暴为例[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 849-860. [Li Yaohui, Shen Jie, Zhao Jianhua, et al. Simulation of terrain effect to the development of sandstorm in Minqin-Take a heavy sandstorm for example[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 849-860.]

[17] 陈荷生. 甘肃民勤盆地水资源条件变化对环境的影响[J]. 自然资源, 1984(3): 62-71. [Chen Hesheng. The influence of water resources condition change on environment in Minqin Basin Gansu Province[J]. Resources Science, 1984(3): 62-71.]

[18] 张书涵. 浅析甘肃民勤生态问题[J]. 知识文库, 2018, 426(3): 200. [Zhang Shuhan. Analysis of ecological problems in Gansu Minqin[J]. Knowledge Library, 2018, 426(3): 200.]

[19] 孙涛, 贾志清, 钱雅玲, 等. 民勤荒漠—绿洲过渡带不同发育阶段白刺灌丛沙堆的防风固沙功能分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(4): 713-724. [Sun Tao, Jia Zhiqing, Qian Yaling, et al. Comparison on functions of wind-break and sand-fixation of *Nitraria tangutorun* Nebkhas at different developmental stages in Minqin desert-oasis transition zone[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2019, 34(4): 713-724.]

[20] 曹永香, 毛东雷, 薛杰, 等. 绿洲-沙漠过渡带植被覆盖动态变化及其驱动因素——以新疆策勒为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 510-521. [Cao Yongxiang, Mao Donglei, Xue Jie, et al. Dynamic changes and driving factors of vegetation cover in the oasis-desert ecotone: A case study of Cele, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 510-521.]

[21] 徐高兴, 赵鹏, 刘光武, 等. 民勤绿洲边缘荒漠植物群落特征研究[J]. 内蒙古林业科技, 2022, 48(1): 14-18. [Xu Gaoxing, Zhao peng, Liu Guangwu, et al. Characteristics of desert vegetation community on the edge of Minqin oasis[J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2022, 48(1): 14-18.]

[22] 赵多明, 张杰, 胡生新, 等. 甘肃民勤连古城国家级自然保护区药用植物资源多样性及珍稀濒危和优势药用植物资源调查[J]. 甘肃科技, 2016, 32(24): 125-131. [Zhao Duoming, Zhang Jie, Hu Shengxin, et al. Investigation of medicinal plant resources diversity and rare, endangered and dominant medicinal plant resources in Gansu Minqin Liangucheng National Nature Reserve [J]. Gansu Science and Technology, 2016, 32(24): 125-131.]

[23] 蔡兆炜, 孙玉军, 刘凤娇. 长白落叶松林下灌木生物量模型研究[J]. 河南农业科学, 2013, 42(6): 126-129. [Cai Zhaowei, Sun Yujun, Liu Fengjiao. Studies on biomass model of understory shrubs in *Larix olgensis* Herry. plantation[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013, 42(6): 126-129.]

[24] Colombo R, Bellingeri D, Fasolini D, et al. Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(1): 120-131.

[25] 王维, 王文杰, 李俊生, 等. 基于归一化差值植被指数的极端干旱气象对西南地区生态系统影响遥感分析[J]. 环境科学研究, 2010, 23(12): 1447-1455. [Wang Wei, Wang Wenjie, Li Junsheng, et al. Remote sensing analysis of impacts of extreme drought weather on ecosystems in southwest region of China based on normalized difference vegetation index[J]. Research of Environmental Science, 2010, 23(12): 1447-1455.]

[26] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295-309.

[27] 段敏杰. 放牧干扰下藏北紫花针茅高寒草地生物量遥感监测[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011. [Duan Minjie. Remote Sensing Monitoring of *Stipa purpurea* Alpine Grassland Aboveground Biomass Under Grazing Disturbance in Northern Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.]

[28] 李响, 刘明, 刘明辉, 等. 基于样本个体差异性的深度神经网络训练方法[J]. 软件学报, 2022, 33(12): 4534-4544. [Li Xiang, Liu Ming, Liu Minghui, et al. Deep neural network training method based on individual differences of samples[J]. Journal of Software, 2022, 33(12): 4534-4544.]

[29] 王佳, 马睿, 马德新. 基于深度学习的登海605玉米品种真伪鉴别方法研究[J/OL]. 中国粮油学报, 2023, 1-12. [Wang Jia, Ma Rui, Ma Dexin. Identification method of Denghai 605 Maize varieties based on deep learning[J/OL]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2023, 1-12.]

[30] 褚璇, 王伟, 赵昕, 等. 近红外光谱和特征光谱的山茶油掺假鉴别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(1): 75-79. [Chu Xuan, Wang Wei, Zhao Xin, et al. Detection of *Camellia oleifera* oil adulterated with sunflower oil with near infrared (NIR) spectroscopy and characteristic spectra[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2017, 37(1): 75-79.]

[31] 王晓珂, 刘婷婷, 许桂玲, 等. 基于冠层高光谱遥感的杂交水稻植被指数氮素营养诊断模型[J]. 中国稻米, 2021, 27(3): 21-29. [Wang Xiaoke, Liu Tingting, Xu Guiling, et al. Nitrogen diagnosis model of vegetation indices based on canopy hyperspectral remote sensing for hybrid rice[J]. Chinese Rice, 2021, 27(3): 21-29.]

[32] 刘晓春. 民勤荒漠草地植物群落及其优势种群结构与动态研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008. [Liu Xiaochun. The Structure and Dynamics of Plant Communities and the Dominant Population in Minqin Desert Grassland [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2008.]

[33] 陶冶. 准噶尔荒漠典型植物群落生物量的分配,估测与空间分布[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014. [Tao Ye. Biomass Allocation, Estimation and Spatial Distribution of Typical Plant Communities in Junggar Desert[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.]

[34] 赵鹏. 民勤绿洲荒漠过渡带植被空间分布及其环境解释[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014. [Zhao Peng. Spatial Distribution of Plant Communities and Environmental Interpretation in Minqin Oasis-Desert Ecotone[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014.]

[35] 贾宝全, 慈龙骏, 蔡体久, 等. 绿洲-荒漠交错带环境特征初步研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1104-1108. [Jia Baoquan, Ci Longjun, Cai Tijiu, et al. Preliminary research on environmental characteristics of oasis-desert ecotone[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9): 1104-1108.]

[36] 马浩, 孟德利, 赵勇, 等. 民勤绿洲植被变化与水资源结构响应关系[J]. 南水北调与水利科技, 2022, 20(5): 902-913. [Ma Hao, Meng Deli, Zhao Yong, et al. Relationship between vegetation change and water resources structure in Minqin oasis[J]. South-to-

North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20 (5): 902–913.]

[37] 郝媛媛. 基于GIS/RS的西北内陆河流域生态恢复效果评价研究——以石羊河下游民勤盆地为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [HAO Yuanyuan. Evaluation of Ecological Restoration Effects Based on GIS/RS for Northwest Inland River Basin, China: A Case Study of Minqin Basin in the Downstream of Shiyang River[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]

[38] 高宇婷, 于洋, 孙凌霄, 等. 塔里木盆地南缘绿洲土地覆盖变化及驱动力[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1172–1183. [Gao Yuting, Yu Yang, Sun Lingxiao, et al. Land coverage change and driving force of an oasis in the southern margin of Tarim Basin[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1172–1183.]

[39] 李恩菊. 巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠沉积物特征的对比研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011. [Li Enju. Comparative Study on Sediment Characteristics of Badain Jaran Desert and Tengger Desert[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2011.]

[40] 李伟娜. 多角度高光谱CHRIS数据估测隆宝滩湿地植被生物量的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017. [Li Weina. Study on Diomass Estimation of Wetland Vegetation in Longbaotan Area based on Multi-angle and Hyperspectral CHRIS Data[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017.]

[41] 马中刚. 康保县荒漠化地区植被覆盖度遥感反演研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016. [Ma Zhonggang. Quantitative Retrieval of Vegetation Cover for Kangbao County- A Desert Area based on Remote Sensing[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.]

[42] 张锦丽, 张丽, 张鲜花, 等. 准噶尔盆地荒漠灌丛植被地上生物量反演研究[J]. 新疆农业大学学报, 2019, 42(3): 202–209. [Zhang Jinli, Zhang Li, Zhang Xianhua, et al. Inversion of aboveground biomass of desert shrub vegetation in Junggar Basin[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2019, 42(3): 202–209.]

[43] Huete A R, Liu H, De Lira G R, et al. A soil color index to adjust for soil and litter noise in vegetation index imagery of arid regions [C]//Proceedings of IGARSS'94–1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 1994: 1042–1043.

Extraction of desert vegetation information based on five vegetation indices

LIANG Boming, LIU Xin, HAO Yuanyuan, CHU Bin, TANG Zhuangsheng

(College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University; Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education; Engineering and Technology Research Center for Alpine Rodent Pest Control, National Forestry and Grassland Administration, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The aboveground biomass of vegetation in desert areas serves as a crucial indicator for monitoring land desertification and extracting desert vegetation information using remote sensing techniques. In this study, the Minqin County of Gansu Province was selected as the experimental area and Sentinel−2 images were used as the data source. We constructed estimation models (unitary linear, exponential, logarithmic, and binomial models) for the planted index and the aboveground biomass of vegetation, which were measured by us. These models include five vegetation indices: ratio vegetation index (RVI), normalized difference vegetation index (NDVI), difference vegetation index (DVI), soil-adjusted vegetation index (SAVI), and optimized soil-adjusted vegetation index (OSAVI). The aboveground biomass in the study area was estimated using the selected optimal model. The results demonstrated that SAVI had the highest correlation with the aboveground biomass (r = 0.79) compared with RVI, NDVI, DVI, and OSAVI. The binomial model based on SAVI was the best model (R^2 = 0.76) for the aboveground biomass estimation in the study area, with higher accuracy (R^2 = 0.73, RMSE = 0.12). In the Minqin County, the relatively dense areas of vegetation were mainly distributed in the four major irrigation districts (Hongyashan, Huanhe, Changning, and Nanhu), the surrounding area of Qingtu Lake, and the northwest region of Hongshagang Town, whereas the vegetation in other regions was relatively sparse. The proportions of nonvegetation area <[0.005 kg·$(100m^2)^{-1}$], low vegetation area [0.005−0.2 kg·$(100m^2)^{-1}$], medium vegetation area [0.2−0.5 kg·$(100m^2)^{-1}$], and high vegetation area [>0.5 kg·$(100m^2)^{-1}$] were 66%, 21%, 5%, and 8%, respectively.

Keywords: vegetation in desert areas; aboveground biomass; vegetation index; information extraction; Sentinel image data